



output port 2. Input  
 signal light is supplied to a light amplifier medium 3.  
 Pump light from a pump  
 light source 4 is introduced to the light amplifier medium  
 3 with an optical  
 coupling means 5. Thus, the light amplifier medium 3  
 becomes a pumping state  
 and an amplifying activation to signal light where  
 wavelength is added to the  
 specified band occurs. An arithmetic means 38 adds, for  
 example, a value  
 $aS_{<SB>1</SB>}$  obtained by multiplying the output  $S_{<SB>1</SB>}$   
 of a first power  
 detecting means 33 by a first constant (a) to the value  
 $bS_{<SB>2</SB>}$  obtained  
 by multiplying the output  $S_{<SB>2</SB>}$  of the second power  
 detecting means 34 by  
 the second constant (b) so as to output the signal with a  
 level corresponding  
 to the value. Then, the means 39 controls a power source  
 31 so as to make the  
 level fixed.

COPYRIGHT: (C)1997, JPO

PAT-NO: JP409153865A

DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 09153865 A

TITLE: LIGHT AMPLIFIER AND OPTICAL  
COMMUNICATION SYSTEM  
PROVIDING THE SAME

PUBN-DATE: June 10, 1997

INVENTOR-INFORMATION:

NAME

ONAKA, HIROSHI

MIYATA, HIDEYUKI

OTSUKA, KAZUE

ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME

FUJITSU LTD

COUNTRY

N/A

APPL-NO: JP07311212

APPL-DATE: November 29, 1995

INT-CL (IPC): H04B010/17, H04B010/16 , H04B010/14 ,  
H04B010/135 , H04B010/13  
                  , H04B010/12

ABSTRACT:

PROBLEM TO BE SOLVED: To eliminate the wavelength dependency of a gain in a specified band by controlling the power of probe light based on the detection result of the power of input signal light and probe light and keeping an amplifying gain to input light constant.

SOLUTION: An amplifying band to input signal light toward an input port 1 is provided and amplified signal light is outputted from an

output port 2. Input  
 signal light is supplied to a light amplifier medium 3.  
 Pump light from a pump  
 light source 4 is introduced to the light amplifier medium  
 3 with an optical  
 coupling means 5. Thus, the light amplifier medium 3  
 becomes a pumping state  
 and an amplifying activation to signal light where  
 wavelength is added to the  
 specified band occurs. An arithmetic means 38 adds, for  
 example, a value  
 $aS_{<SB>1}</SB>$  obtained by multiplying the output  $S_{<SB>1}</SB>$   
 of a first power  
 detecting means 33 by a first constant (a) to the value  
 $bS_{<SB>2}</SB>$  obtained  
 by multiplying the output  $S_{<SB>2}</SB>$  of the second power  
 detecting means 34 by  
 the second constant (b) so as to output the signal with a  
 level corresponding  
 to the value. Then, the means 39 controls a power source  
 31 so as to make the  
 level fixed.

COPYRIGHT: (C)1997,JPO



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 入力信号光に対する増幅帯域を有し、増幅された信号光を出力する光増幅器であって、上記入力信号光が供給される光増幅媒体と、ポンプ光を出力するポンプ光源と、上記光増幅媒体及び上記ポンプ光源に動作的に接続され上記ポンプ光を上記光増幅媒体へ導入する第1の光結合手段と、波長が上記増幅帯域に含まれるプローブ光を出力するプローブ光源と、上記光増幅媒体及び上記プローブ光源に動作的に接続され上記プローブ光を上記光増幅媒体へ導入する第2の光結合手段と、上記入力信号光のパワーを検出する第1のパワー検出手段と、上記プローブ光のパワーを検出する第2のパワー検出手段と、上記第1及び第2のパワー検出手段の出力に基づき上記プローブ光のパワーを制御して上記入力信号光に対する増幅利得を一定に保つ制御手段とを備えた光増幅器。

【請求項2】 上記入力信号光は波長分割多重された複数の信号光からなる請求項1に記載の光増幅器。

【請求項3】 上記増幅された信号光のパワーを検出する第3のパワー検出手段と、該第3のパワー検出手段の出力が一定になるように上記ポンプ光のパワーを制御する手段とを更に備えた請求項1に記載の光増幅器。

【請求項4】 上記第3のパワー検出手段は、上記光増幅媒体に動作的に接続され上記増幅された信号光を通過させ上記プローブ光を実質的に遮断する光バンドパスフィルタと、該光バンドパスフィルタから出力された光を第1及び第2の分岐光に分岐する手段と、該第1の分岐光を受けそのパワーに応じた電気信号を出力するフォトディテクタとを含み、上記第2の分岐光がこの光増幅器から出力される請求項3に記載の光増幅器。

【請求項5】 上記第1のパワー検出手段は、上記第1の光結合手段に動作的に接続され上記入力信号光を第1及び第2の分岐光に分岐する手段と、該第1の分岐光を受けそのパワーに応じた電気信号を出力する第1のフォトディテクタとを含み、該第2の分岐光が上記光増幅媒体に供給され、上記プローブ光源はフォワード光及びバックワード光を出力するレーザダイオードからなり、該フォワード光が上記光増幅媒体に供給され、上記第2のパワー検出手段は、上記バックワード光を受けそのパワーに応じた電気信号を出力する第2のフォトディテクタを含む請求項1に記載の光増幅器。

【請求項6】 上記制御手段は、

上記第1及び第2のパワー検出手段に動作的に接続され該第1及び第2のパワー検出手段の出力に基づく演算を行ってその演算結果を出力する演算手段と、該演算手段の出力が一定になるように上記プローブ光源を制御する手段とを含む請求項1に記載の光増幅器。

【請求項7】 上記演算手段は、上記第1のパワー検出手段の出力に第1の定数を乗じた値を、上記第2のパワー検出手段の出力に第2の定数を乗じた値に加えて出力する請求項6に記載の光増幅器。

10 【請求項8】 上記制御手段は、上記第1のパワー検出手段の出力に基づき上記プローブ光のパワーを補正して上記増幅利得が波長に依存して変化しない帯域を実質的に拡大する手段をさらに含む請求項6に記載の光増幅器。

【請求項9】 上記制御手段は、上記第1及び第2のパワー検出手段の出力をそれぞれデジタル信号に変換するアナログ／デジタル変換器と、上記デジタル信号を受け予め定められたプログラムに従って上記プローブ光の最適パワーを算出するプロセッサとを含む請求項1に記載の光増幅器。

20 【請求項10】 上記光増幅媒体は希土類元素がドープされたドープファイバからなり、該ドープファイバは上記入力信号光が供給される第1端と上記増幅された信号光を出力する第2端とを有している請求項1に記載の光増幅器。

【請求項11】 上記希土類元素はエルビウムである請求項10に記載の光増幅器。

【請求項12】 上記第1の光結合手段は、上記ポンプ光を上記ドープファイバの第1端及び第2端のいずれか一方に供給する手段を含む請求項10に記載の光増幅器。

30 【請求項13】 上記ポンプ光源は第1及び第2のレーザダイオードを含み、上記第1の光結合手段は、上記第1のレーザダイオードからの光を上記ドープファイバの第1端に供給する手段と、上記第2のレーザダイオードからの光を上記ドープファイバの第2端に供給する手段とを含む請求項10に記載の光増幅器。

【請求項14】 上記第2の光結合手段は、上記プローブ光を上記ドープファイバの第1端及び第2端のいずれか一方に供給する手段を含む請求項10に記載の光増幅器。

40 【請求項15】 波長分割多重信号光を増幅して出力する光増幅器であって、上記波長分割多重信号光が供給される光増幅媒体と、該光増幅媒体をポンピングする手段と、上記光増幅媒体から出力する増幅された波長分割多重信号光のスペクトラムを検出するモニタ手段と、該検出されたスペクトラムに基づき、上記光増幅媒体の利得と波長との関係を表す利得特性が依存するパラメー

50

タを制御し、上記波長分割多重信号光のそれぞれの波長を含む帯域における上記利得特性がフラットになるようにするパラメータ制御手段とを備えた光増幅器。

【請求項16】 上記ポンピング手段は、ポンプ光を出力するポンプ光源と、該ポンプ光を上記光増幅媒体へ導入する手段とを含み、

上記パラメータは上記ポンプ光のパワーである請求項15に記載の光増幅器。

【請求項17】 上記光増幅媒体から出力する増幅された波長分割多重信号光が供給される可変光減衰器と、該可変光減衰器から出力される光のパワーを検出する手段と、

該検出されたパワーが一定になるように上記可変光減衰器の減衰率を制御する手段とをさらに備えた請求項16に記載の光増幅器。

【請求項18】 上記光増幅媒体の増幅帯域にその波長が含まれるプローブ光を出力するプローブ光源と、該プローブ光を上記光増幅媒体へ導入する手段とをさらに備え、

上記パラメータは上記プローブ光のパワーである請求項15に記載の光増幅器。

【請求項19】 波長分割多重信号光を出力する第1の端局と、

該波長分割多重信号光を受け、これを増幅して出力する光中継器と、

該光中継器から出力される増幅された波長分割多重信号光を受ける第2の端局とを備え、

上記第1の端局は、上記波長分割多重信号光の少なくとも2つのチャンネルをそれぞれ異なる周波数のパイロット信号で変調する手段を含み、

上記光中継器は請求項15に記載の光増幅器を含み、

上記モニタ手段は、上記各パイロット信号に対応する成分を検出する手段を含み、

上記パラメータ制御手段は、上記検出された各成分の振幅がほぼ等しくなるように制御する手段を含む光通信システム。

【請求項20】 上記第1の端局は、上記各パイロット信号に基づき上記波長分割多重信号光の各チャンネルの波長を安定化する手段を含む請求項19に記載の光通信システム。

【請求項21】 上記光中継器は複数あり、これらは直列に接続される請求項19に記載の光通信システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、波長分割多重された複数の信号光の一括増幅に適した光増幅器に関し、さらに、この光増幅器の光通信システムへの適用に関する。

【0002】将来のマルチメディアネットワークを構築するため、さらなる大容量の光通信システムが要求されている。超大容量化を実現するための光通信システムと

して、時分割(Time-Division Multiplexing:TDM)システム、光領域での時分割多重(Optical Time-Division Multiplexing:OTDM)システム、波長分割多重(Wavelength-Division Multiplexing:WDM)システム等に関する研究が盛んに行われている。これらのうち、WDMシステムは、エルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)の広い利得帯域を活用し光領域でのクロスコネクトや分岐/挿入或いは異種サービスの多重化を行う柔軟な光波ネットワークを実現するものとして期待されている。

【0003】

【従来の技術】WDMシステムは、現在世界的に最も普及している既設の1.3μm帯零分散シングルモードファイバネットワークを用いて超大容量伝送を行う場合に、他のシステムと比較して有利であると考えられている。これは、各光キャリア当たりの伝送速度が低く、波長分散許容値や光ファイバの非線形効果で制限される光入力パワーの許容値を比較的大きく設定することができるからである。

【0004】WDMシステムを実現するためには、広帯域にわたり一定の増幅利得を持つ光増幅器が必要になる。EDFAは、1530nm～1560nm程度にわたり増幅帯域(利得帯域)を有しているが、その利得は波長に対して必ずしも一定ではない。即ち、EDFAの利得は信号光の波長に依存して変化するのである。

【0005】EDFAの利得の波長依存性を低減させる技術として、A1をErと共に添加したドーパファイバの使用が提案されている(C. G. Atkins et al., Electron Lett., Vol. 25, pp910-911 (1989))。また、EDFAの動作点を最適化する方法(M. Suyama et al., OA '93, MB5-1(1993))や、光フィルタを使用して利得特性をフラットにする方法(H. Toba et al., IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 5, No.2, pp248(1993))が提案されている。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、利得の波長依存性を低減させるための上述した従来の各技術は、それぞれが有する固有の問題の存在により、信号光の入力パワーやWDMのチャンネル数が変化したときに利得の波長依存性が大きくなることがある、という欠点を有している。

【0007】よって、本発明の目的は、入力パワーやWDMのチャンネル数の変化に係わらず利得の波長依存性が小さい光増幅器を提供することにある。本発明の他の目的は、この光増幅器が適用される光通信システムを提供することにある。

【0008】

【課題を解決するための手段】本発明の第1の側面によると、入力信号光に対する増幅帯域を有し、増幅された信号光を出力する光増幅器であって、上記入力信号光が

供給される光増幅媒体と、ポンプ光を出力するポンプ光源と、上記光増幅媒体及び上記ポンプ光源に動作的に接続され上記ポンプ光を上記光増幅媒体へ導入する第1の光結合手段と、波長が上記増幅帯域に含まれるプローブ光を出力するプローブ光源と、上記光増幅媒体及び上記プローブ光源に動作的に接続され上記プローブ光を上記光増幅媒体へ導入する第2の光結合手段と、上記入力信号光のパワーを検出する第1のパワー検出手段と、上記プローブ光のパワーを検出する第2のパワー検出手段と、上記第1及び第2のパワー検出手段の出力に基づき上記プローブ光のパワーを制御して上記入力信号光に対する増幅利得を一定に保つ制御手段とを備えた光増幅器が提供される。

【0009】望ましくは、上記入力信号光は、波長分割多重された複数の信号光からなる。また、望ましくは、この光増幅器は、増幅された信号光のパワーを検出する第3のパワー検出手段と、第3のパワー検出手段の出力が一定になるようにポンプ光のパワーを制御する手段とをさらに備えている。

【0010】本発明の第2の側面によると、波長分割多重信号光を増幅して出力する光増幅器であって、上記波長分割多重信号光が供給される光増幅媒体と、該光増幅媒体をポンピングする手段と、上記光増幅媒体から出力する増幅された波長分割多重信号光のスペクトラムを検出するモニタ手段と、該検出されたスペクトラムに基づき、上記光増幅媒体の利得と波長との関係を表す利得特性が依存するパラメータを制御し、上記波長分割多重信号光のそれぞれの波長を含む帯域における上記利得特性がフラットになるようにするパラメータ制御手段とを備えた光増幅器が提供される。

【0011】本発明の光通信システムは、波長分割多重信号光を出力する第1の端局と、該波長分割多重信号光を増幅して出力する光中継器と、該光中継器から出力される増幅された波長分割多重信号光を受ける第2の端局とを備えている。

【0012】第1の端局は、波長分割多重信号光の少なくとも2つのチャネルをそれぞれ異なる周波数のパイロット信号で変調する手段を含む。光中継器は、本発明の第2の側面による光増幅器を含む。そしてそのモニタ手段は、各パイロット信号に対応する成分を検出する手段を含み、パラメータ制御手段は、検出された各成分の振幅がほぼ一定になるように制御する手段を含む。

【0013】

【作用】本発明の第1の側面による光増幅器においては、入力信号光及びプローブ光のパワーの検出結果に基づきプローブ光のパワーを制御して入力光に対する増幅利得を一定に保つようにしているので、入力パワー等の変化に係わらずある特定の帯域における利得の波長依存性を実質的になくすることができる。

【0014】本発明の第2の側面による光増幅器におい

ては、増幅された波長分割多重信号光のスペクトラムが検出され、この検出されたスペクトラムに基づく制御が行われるので、入力パワーやWDMのチャネル数の変化に係わらず利得の波長依存性を実質的になくすることができる。

【0015】本発明の光通信システムにおいては、波長分割多重信号光の少なくとも2つのチャネルがそれぞれ異なる周波数のパイロット信号により変調されているので、光中継器において各パイロット信号に対応する成分を検出することによって、増幅された波長分割多重信号光のスペクトラムの概要をモニタリングすることができる。

【0016】尚、各パイロット信号は、第1の端局における波長分割多重信号光の波長安定化のために使用される低周波重畳信号と兼用することができる。

【0017】

【実施例】以下、本発明の実施例を添付図面に従って詳細に説明する。図1は本発明を適用可能な光増幅器の基本構成を示すブロック図である。この光増幅器は、入力ポート1への入力信号光に対する増幅帯域を有しており、増幅された信号光を出力ポート2から出力する。

【0018】入力信号光は光増幅媒体3へ供給される。光増幅媒体3は、一般的には、Er（エルビウム）等の希土類元素がドーブされたドーブファイバである。ポンプ光源4からのポンプ光が光結合手段5を介して光増幅媒体3へ導入される。これにより光増幅媒体3がポンピング状態となり、波長が特定の帯域に含まれる信号光に対する増幅作用が生じる。エルビウムドーブファイバを波長0.98 $\mu$ mのポンプ光でポンピングした場合、

1.55 $\mu$ m帯の信号光が増幅される。

【0019】信号光とポンプ光とを光増幅媒体3内で同じ方向に伝搬させる場合には、光結合手段5は例えば入力ポート1と光増幅媒体3の間に設けられるWDMカプラを含み、信号光とポンプ光とを光増幅媒体内で互いに逆方向に伝搬させる場合には、光結合手段5は例えば光増幅媒体3と出力ポート2の間に設けられるWDMカプラを含む。

【0020】以下、エルビウムドーブファイバ増幅器（EDFA）を例に取り、その特性等について説明する。図2は、EDFAにおける典型的なASE（Amplified Spontaneous Emission）のスペクトラムを示す図である。縦軸はパワー（dBm）、横軸は波長（ $\mu$ m）である。

【0021】ASEスペクトラムは、光増幅器の小信号に対する利得特性をほぼ反映していることが知られている。ここで、利得特性は、光増幅媒体における利得と入力信号光の波長との関係を表すものである。

【0022】図2から理解されるように、1.535 $\mu$ m近辺に利得のピークがあり、利得特性はフラットではない。図3は、光増幅器の利得と光出力パワーとの関係



を示す図である。NSRで示す非飽和領域は、EDFAにおいて反転分布状態となっているErイオンの割合が大きく、出力光パワーの変化に係わらず一定利得が得られる状態に対応している。

【0023】SRで示される飽和領域は、反転分布状態のErイオンの割合が減少し、光出力パワーが増大するのに従って利得が急激に低下している状態を示している。非飽和領域にあるか飽和領域にあるかは、例えばポンプ光のパワーによって決定される。入力パワーに対してポンプ光のパワーが十分にある場合には、反転分布状態となつてErイオンの割合が大きくなり非飽和領域となり、一方、入力パワーに対してポンプ光のパワーが小さい場合には、反転分布状態のErイオンの割合が減少し、飽和領域となる。

【0024】非飽和領域及び飽和領域で動作している光増幅器をそれぞれ複数直列に接続したときのASE帯域を測定した例を図4により説明する。図4は、ASEの3dB帯域幅(nm)と、光増幅器の段数との関係を示す図である。3dB帯域幅が大きいほど、利得特性がフラットとなる。

【0025】光増幅器の段数が増大すると、非飽和領域で動作している場合には3dB帯域幅の減少は少ないが、飽和領域で動作している場合には、3dB帯域幅が急激に減少していることがわかる。このことは、光送信機を含む第1の端局と光受信機を含む第2の端局とこれらの間に設けられる複数の光増幅器(光中継器)とを備えた多段中継システムにWDMを適用したときに、利得特性がフラットでないことによる受信感度の低下等の致命的な影響が現れることを示している。

【0026】図5は反転分布状態をパラメータとした利得特性の変化を説明するための図である。縦軸はローカル利得(dB/m)、横軸は波長(nm)である。反転分布状態を表すパラメータ $N_2/N_t$ は、反転分布状態にあるErイオンの全Erイオンに対する割合を示している。 $N_2/N_t=1$ である場合、全Erのイオンが上位の準位に遷移して完全な反転分布が得られていることになる。

【0027】 $N_2/N_t$ が変化するのに従って、利得特性が連続的に変化していることが明らかである。典型的なEDFAにおいては、ポンプ光のパワーは、光出力パワーが一定になるように制御されている。また、EDFAへ入力する信号光のパワーは、システムの使用条件や経時劣化により変化する。この変化に追従して前述のように光出力パワーが一定になるような制御を行うと、反転分布状態が変化することになり、利得特性、即ち利得の波長依存性が大きく変化してしまうのである。なぜならば、図3による説明にあったように、利得特性がポンプ光のパワーに大きく依存するからである。

【0028】従って、光フィルタを用いて利得特性をフラットにする従来の技術は、入力光パワーに応じて光フ

ィルタの特性を変化させる制御を必要とし、システムが著しく複雑化することになる。

【0029】図5において、 $N_2/N_t=0.7$ の近傍で1540~1560nmの帯域に対してフラットな利得特性が得られることがわかる。従って、常にEDFAの動作状態をこの反転分布状態に維持することができれば、利得の波長依存性をなくせることになる。

【0030】例えば、ポンプ光のパワーを最適に制御することによって、光増幅器の利得を一定に保つ技術が、電子情報通信学会技術研究報告、OCS94-66, pp31-36に示されている。

【0031】図6は利得を一定に保つ従来技術を示すブロック図である。入力ポート11からの信号光は、光アイソレータ12を介してWDMカプラ13へ供給される。ポンプLD14からのポンプ光がWDMカプラ13において信号光と加え合わされ、信号光及びポンプ光はEDF(エルビウムドープファイバ)15に入力する。

【0032】EDF15において増幅された信号光は、光アイソレータ16、光減衰器17及び光カプラ18をこの順に通って出力ポート19から出力される。ポンプLD14の駆動電流は自動ファイバ利得コントローラ(AFGC)20によって制御される。利得コントローラ20は、EDF15から出力されるASEのパワー等に基づき、EDF15における利得が一定になるようにポンプ光のパワーを制御する。

【0033】増幅された信号光の一部は光カプラ18において分岐され、この分岐光はフォトディテクタ21によって電気信号に変換される。自動パワーコントローラ(APC)22は、フォトディテクタ21の出力信号のレベルが一定になるように光減衰器の減衰率を制御する。

【0034】図6に示される光増幅器において注目すべき点は、EDF15における利得を一定に保つために、ポンプ光のパワーを制御しているところにある。このことにより光増幅器の出力パワーを一定に保つ自動パワー制御(APC)を行うために、EDF15で増幅された信号光を減衰率が制御される光減衰器17によりわざわざ減衰させているのである。

【0035】従って、この従来技術は、光減衰器の使用による最大光出力パワーの低下や、減衰率可変型の光減衰器を使用することによるコストの増大といった欠点を有している。

【0036】図7は本発明の第1の側面による光増幅器の基本構成を示すブロック図である。この光増幅器は、図1の構成と同様に、入力ポート1及び2とこれらの間の主光路に設けられる光増幅媒体3とを備えており、ポンプ光源4からのポンプ光は、第1の光結合手段5によって光増幅媒体3へ導入される。

【0037】図7の基本構成は、さらに、プローブ光を出力するプローブ光源31と、プローブ光を光増幅媒体

3へ導入する第2の光結合手段32と、入力信号光のパワーを検出する第1のパワー検出手段33と、プローブ光のパワーを検出する第2のパワー検出手段34と、パワー検出手段33及び34の出力に基づきプローブ光のパワーを制御する制御手段35とを備えている。

【0038】プローブ光源31から出力されるプローブ光の波長は、光増幅媒体の増幅帯域に含まれており、この波長は望ましくは信号光の波長とは異なる。制御手段35による制御の結果、入力信号光に対する光増幅媒体の増幅利得は一定に保たれる。

【0039】望ましくは、この基本構成は、光増幅媒体で増幅された信号光のパワーを検出する第3のパワー検出手段36と、パワー検出手段36の出力が一定になるようにポンプ光のパワーを制御する手段37とをさらに備えている。

【0040】また、望ましくは、制御手段35は、パワー検出手段33及び34の出力に基づく演算を行ってその演算結果を出力する演算手段38と、演算手段38の出力が一定になるようにプローブ光源31を制御する手段39とを含む。

【0041】演算手段38は、例えば、第1のパワー検出手段33の出力 $S_1$ に第1の定数 $a$ を乗じた値 $aS_1$ を、第2のパワー検出手段34の出力 $S_2$ に第2の定数 $b$ を乗じた値 $bS_2$ に加えて、その値に対応したレベルを有する信号を出力する。そして、そのレベルが一定になるように、手段39がプローブ光源31を制御する。

【0042】手段36及び37は、この光増幅器の出力パワーを一定に保つAPCを行うためのものである。ここでは、APCによってポンプ光のパワーが制御されているので、これに伴い反転分布の割合 $N_2/N_t$ が変化してしまう。その結果、図5から明らかなように、APCのために制御されたポンプ光のパワーは利得の波長依存性を変化させる。

【0043】本発明の第1の側面によると、利得の波長依存性を一定に保つために、プローブ光のパワーが制御される。即ち、APCのためのポンプ光のパワー制御に起因する $N_2/N_t$ の変化とは独立に、プローブ光のパワーによって $N_2/N_t$ を変化させることによって、利得の波長依存性を一定にしているのである。

【0044】条件の設定は具体的には例えば次のようになされる。入力信号光のパワーの変化(WDMが適用されている場合におけるチャネル数の変化によるものを含む)の最大値と最小値のほぼ中間のときに、プローブ光のパワーが制御可能な範囲の中間程度となるようにしておく。この設定の下で、光増幅器の出力パワーが予め定められた値となり、且つ、利得特性がフラットになるように、光増幅媒体3のパラメータやポンプ光のパワーが設定される。光増幅媒体3のパラメータは、例えばEDFの長さやドープされたErイオンの濃度である。

【0045】尚、ポンプ光源4の最大出力については、

入力信号光のパワーが最小値となった場合であっても上述の予め定められたパワーの光出力が得られるように余力を残しておくことが望ましい。

【0046】このような設定により、図5において例えば $N_2/N_t$ が0.7で一定になるような制御を行うことができる。 $N_2/N_t$ がほぼ0.7で一定に保たれると、FGRで示される平坦利得領域に波長が含まれる信号光に対して一定の利得特性を得ることができる。図5の例では、平坦利得領域FGRは1540~1560nmの範囲である。

【0047】入力信号光のパワーが小さくなる方向に変化した場合、反転分布状態にあるErイオンの数が増加して $N_2/N_t$ の値が大きくなるので、長波長側の利得に対して短波長側の利得が相対的に大きくなる(図5参照)。そこで、入力信号のパワーが減少するのに従ってプローブ光のパワーを増大させることによって、 $N_2/N_t$ の値が0.7に戻るようにし、これによりフラットな利得特性が保たれる。

【0048】一方、入力信号光のパワーが大きくなる方向に変化した場合には、反転分布状態にあるErイオンの数が減少して $N_2/N_t$ の値が小さくなるので(図5参照)、長波長側の利得が短波長側の利得と比べて相対的に大きくなる。そこで、入力信号光のパワーが増加するのに従ってプローブ光のパワーを減少させることによって、 $N_2/N_t$ の値が0.7で保たれる。

【0049】光増幅媒体3へ供給される信号光及びプローブ光のパワーがほぼ一定になるような制御を行うことによって、 $N_2/N_t$ をほぼ一定に保つことができる。演算手段38における前述した演算の例示は、このような制御をロスの補償等を行いつつ実現するために適切なものである。

【0050】図8は図7の光増幅器の第1実施例を示すブロック図である。入力ポート1と出力ポート2の間には、光アイソレータ41、光カプラ42、WDMカブラ43、光カプラ44、EDF45、光アイソレータ46、光バンドパスフィルタ47及び光カプラ48がこの順に光学的に接続されており、これにより信号光の主光路が形成されている。

【0051】光カプラ42は入力信号光の一部を主光路から分岐するためのものであり、この分岐光はフォトディテクタ(フォトダイオード)49によって電気信号に変換され増幅器50を介して制御回路51へ供給される。

【0052】ポンプ駆動回路52によって駆動されているレーザダイオード53からのポンプ光が、WDMカブラによって主光路に導入され、このポンプ光は光カプラ44を経てEDF45の第1端へ供給される。EDF45の第1端は主光路の上流側に、第2端は下流側にある。

【0053】プローブ駆動回路54によって駆動されて

## 11

いるレーザダイオード55からのプローブ光は、光カプラ44によって主光路に導入され、EDF45の第1端へ供給される。

【0054】レーザダイオード55は、パワーが互いに等しく或いは比例して変化するフォワード光及びバックワード光を出力し、この例ではフォワード光がプローブ光として用いられる。バックワード光はフォトディテクタ56により電気信号に変換され、この電気信号は増幅器57で増幅されて制御回路51へ供給される。

【0055】光バンドパスフィルタ47は、EDF45で増幅された信号光を通過させ、増幅されたプローブ光を実質的に遮断する。光バンドパスフィルタ47は、さらに、EDF45における光増幅過程で消費されなかったポンプ光を遮断する。

【0056】光バンドパスフィルタ47を通過した光の一部は、光カプラ48で分岐され、フォトディテクタ58により電気信号に変換される。この電気信号は増幅器59で増幅されてAPC回路60へ供給される。

【0057】プローブ駆動回路54がレーザダイオード55へ供給する電流は、制御回路51によって制御され、ポンプ駆動回路52がレーザダイオード53へ供給する電流は、APC回路60によって制御される。

【0058】各図において実質的に同一の部分には同一の符号が付されている。図7及び図8の各部分の対応関係は次の通りである。第1のパワー検出手段33は光カプラ42、フォトディテクタ49及び増幅器50に対応し、第2のパワー検出手段34はフォトディテクタ56及び増幅器57に対応し、制御手段35は制御回路51に対応し、プローブ光源31はプローブ駆動回路54及びレーザダイオード55に対応し、第2の光結合手段32は光カプラ44に対応し、光増幅媒体3はEDF45に対応し、第1の光結合手段5はWDMカプラ43に対応し、ポンプ光源4はポンプ駆動回路52及びレーザダイオード53に対応し、第3のパワー検出手段36は光バンドパスフィルタ47、光カプラ48、フォトディテクタ58及び増幅器59に対応し、手段37はAPC回路60に対応している。

【0059】図7に示される演算手段38が既に例示されている演算を行う場合において、 $N2/Nt$ を正確に一定に保つためには、増幅された信号光及びプローブ光のパワーと光増幅媒体から出力されるASE成分のパワーとを検出し、これらの総和が一定になるような制御を行うことが要求される。このとき、光増幅媒体への総入力パワーはプローブ光の制御により一定に保たれ、且つ、光増幅器の光出力の総和も一定に保たれるので、この光増幅器は結局一定の利得を保つこととなり、 $N2/Nt$ は一定に保たれる。

【0060】図8の実施例においては、第3のパワー検出手段36（図7参照）が光バンドパスフィルタ47を含んでおり、光バンドパスフィルタ47は増幅されたプ

## 12

ローブ光を除去するので、APC回路60は、光バンドパスフィルタ47を通過した増幅された信号光及びその波長付近の帯域で発生しているASE成分のパワーが一定に保たれるようにポンプ光を制御することとなる。その結果、入力信号光のパワーのダイナミックレンジが大きい場合には、 $N2/Nt$ を常に一定に保つことが困難になる可能性がある。この問題に対処するための実施例を図9により説明する。

【0061】図9は図7の光増幅器の第2実施例を示すブロック図である。この光増幅器は、図8の第1実施例と対比して、補正回路71を付加的に設けてある点で特徴付けられる。補正回路71は、増幅器50の出力信号、即ち第1のパワー検出手段33（図7参照）の出力信号を受け、プローブ駆動回路54がレーザダイオード55へ供給する電流を補正する。これにより、EDF45へ供給されるプローブ光のパワーが補正され、増幅利得が波長に依存して変化しない帯域を実質的に拡大することができる。

【0062】図10は図7の光増幅器の第3実施例を示すブロック図である。この光増幅器を図8の第1実施例と対比したときの特徴点は以下の通りである。第1に、ポンプ光源4（図7参照）がレーザダイオード53の他に、ポンプ駆動回路81によって駆動されるレーザダイオード82を含んでおり、これに伴いレーザダイオード82からのポンプ光をEDF45へその第2端から導入するためにWDMカプラ83を設けていることである。WDMカプラ83はEDF45と光アイソレータ46との間に設けられている。この例では、WDMカプラ43及び83が図7の第1の光結合手段5に対応している。

【0063】この実施例の第2の特徴点は、制御手段35が予め定められたプログラムに従ってプローブ光の最適パワーを算出するCPU（中央演算ユニット）84を含んでいるところにある。ポンプ駆動回路52及び81並びにプローブ駆動回路54の入力信号及び出力信号並びに増幅器50及び59の出力信号はアナログ信号であるから、これをCPU84におけるデジタル信号処理に適合させるために、制御手段35は、アナログ/デジタル変換及びデジタル/アナログ変換を行うためのコンバータ85をさらに含んでいる。

【0064】また、CPU84は、プログラムを恒久的に記憶するためのROM及び計算結果等を一時的に記憶するためのRAMを含むメモリ回路86に接続されている。尚、CPU84は、プローブ光の最適パワーを算出するだけでなく、APCのためのポンプ光のパワーの制御にも供される。

【0065】WDMカプラ43、ポンプ駆動回路52及びレーザダイオード53を省略することによって、ポンプ光がEDF45へその第2端のみから供給されるようにしてもよい。

【0066】図11は図7の光増幅器の第4実施例を示

すブロック図である。第1の光結合手段5（図7参照）がWDMカプラ43及び83を含んでいる点は図10の第3実施例と同じである。

【0067】図11の光増幅器は、図10の第3実施例と対比して、第2の光結合手段32（図7参照）がEDF45と動作的に接続される光カプラ44'を含んでいる点で特徴付けられる。本願明細書において、光学部品同士が動作的に接続されるというのは、ファイバ接続或いはコリメートビームを用いた空間接続により直接接続される場合を含み、さらに光フィルタ等の他の光学部品を介して接続される場合を含む。

【0068】光カプラ44'はWDMカプラ83と光アイソレータ46の間に設けられる。レーザダイオード55からのプローブ光は、光カプラ44'及びWDMカプラ83をこの順に通ってEDF45へその第2端から供給される。プローブ光のパワーの制御はこれまでの実施例におけるのと同様である。

【0069】この実施例においては、光カプラ44'が主光路におけるEDF45の下流側に設けられているので、プローブ光は主光路において信号光と逆方向に伝搬し、従って、出力ポート2又はフォトディテクタ58に対するプローブ光の遮断が容易である。具体的には、プローブ光の波長と信号光の波長とが極めて近い場合に、光バンドパスフィルタ47の通過帯域の設計精度が緩和される。

【0070】また、主光路におけるEDF45の上流側に光カプラ44（図10参照）が不要になるので、EDF45へ供給される入力信号光のロスが小さくなり、良好な雑音指数を得ることができる。

【0071】しかしながら、EDF45における信号光の伝搬方向とプローブ光の伝搬方向とが逆になるので、EDF45における空間的な反転分布の状態が本来増幅したい信号光のパワー分布と異なり、前に例示した演算では広い帯域に渡って利得特性をフラットにすることが困難になるかも知れない。

【0072】このような困難が予想される場合には、入力信号光のパワーに応じてプローブ光のパワーをきめ細かく補正すれば対処可能であり、例えば図11の光増幅器においては、入力信号光のパワーに応じた最適なプローブ光のパワーのデータテーブルをメモリ回路86に作成しておき、このテーブルに基づいてプローブ光の制御を行えばよい。

【0073】これまでに説明した本発明の第1の側面による光増幅器は、波長分割多重された複数の信号光からなるWDM信号光の伝送に適しているが、この光増幅器はWDMシステムへの適用に限定されない。単一波長の信号光を増幅する場合にも、フラットな利得特性は波長変動に伴う伝送特性の劣化を排除し得る。

【0074】次に、WDMシステムに限定的に適用されるのに適した光増幅器について説明する。図12は本発

明の第2の側面による光増幅器の基本構成を説明するためのブロック図である。この光増幅器は、入力ポート1へ供給されたWDM信号光を増幅して出力ポート2から出力する。

【0075】WDM信号光を増幅するために、光増幅媒体3と光増幅媒体3をポンピングする手段101とを備えている。この光増幅器は、さらに、光増幅媒体3から出力する増幅されたWDM信号光のスペクトラムを検出するモニタ手段102と、検出されたスペクトラムに基づき光増幅媒体3の利得特性が依存するパラメータを制御しWDM信号光の波長を含む帯域における利得特性がフラットになるようにするパラメータ制御手段103とを備えている。

【0076】ポンピング手段101は、例えば、ポンプ光を出力するポンプ光源4と、ポンプ光を光増幅媒体3へ導入する光結合手段5とを含む。この場合、パラメータ制御手段103によって制御されるパラメータとしては、ポンプ光のパワーを採用することができる。

【0077】制御されるパラメータがポンプ光のパワーである場合、望ましくは、この光増幅器は、さらに、光増幅媒体3から出力する増幅されたWDM信号光が供給される可変光減衰器104と、可変光減衰器から出力される光のパワーを検出するパワー検出手段105と、検出されたパワーが一定になるように可変光減衰器104の減衰率を制御する手段106とを備える。

【0078】図12に示される光増幅器においては、パラメータ制御手段103の制御対象がポンプ光のパワーであるので、APCを行うために可変光減衰器104が用いられているが、本発明の第2の側面による光増幅器の基本構成は図示された例に限定されない。例えば、本発明の第1の側面による光増幅器におけるのと同じようにプローブ光源を用い、プローブ光のパワーをパラメータ制御手段103の制御対象としてもよい。この場合、ポンプ光のパワーを用いてAPCを行うことができる。

【0079】図13は図12の基本構成の第1実施例を示す光増幅器のブロック図である。この光増幅器は、図11の実施例におけるハードウェアを含んでおり、CPU84及び記憶装置86におけるプログラムが本発明の第2の側面に従って変更されている。この光増幅器は、さらに、主光路における光カプラ48と出力ポート2の間に設けられる光カプラ110と、モニタ手段102とを含む。

【0080】光カプラ110はEDF45で増幅されたWDM信号光を二分岐する。第1の分岐光は出力ポート2から出力され、第2の分岐光がモニタ手段102へ供給される。

【0081】パラメータ制御手段103（図12参照）の制御対象は、レーザダイオード55から出力されるプローブ光のパワーであり、レーザダイオード53及び55から出力されるポンプ光はAPCに用いられる。尚、

パラメータ制御手段103はCPU84に含まれるものとして理解される。

【0082】モニタ手段102は、グレーティング111と、光カプラ110からの第2の分岐光のビームパラメータを変換してグレーティング111の全面に照射するためのレンズ112と、複数の受光エレメントを有するフォトセンサアレイ113と、グレーティング111での回折光をフォトセンサアレイの受光面上に収束させるためのレンズ114とを含む。

【0083】グレーティング111における回折角は波長によって異なるので、この回折角の違いに基づきフォトセンサアレイ113で得られるパワー分布を用いることによって、WDM信号光のスペクトラムを検出することができる。フォトセンサアレイ113における光パワー分布は、リード回路によって読み出され、リード回路115の出力信号は、信号処理回路116によって取り扱い易い形に変換された後、コンバータ85を介して或いは直接CPU84へ供給される。

【0084】信号処理回路116は、例えば、WDM信号光の各チャネルに対応するスペクトルピークの値を算出する。この場合、CPU84は、例えば、各ピークの高さがほぼ等しくなるようにプローブ光のパワーを制御する。図14は図12の基本構成の第2実施例を示す光増幅器のブロック図である。この光増幅器は本発明の光通信システムに適用可能である。この光増幅器は、図13の実施例と対比して、モニタ手段102及びパラメータ制御手段103(図12参照)の構成及び動作が異なる点で特徴付けられる。その詳細については後述する。

【0085】図15は本発明の光通信システムのブロック図である。このシステムは、第1の端局121と第2の端局122との間に光ファイバ等からなる光伝送路123を敷設し、その途中に複数の光中継器124を挿入して構成されている。各光中継器124は、本発明の第2の側面による光増幅器(例えば図14の光増幅器)を含む。

【0086】第1の端局121はWDM信号光を出力する。各光中継器は、WDM信号光を受けこれを増幅して出力する。各光中継器124によって中継されたWDM信号光は、第2の端局122で受信される。

【0087】第1の端局121は、WDM信号光の少なくとも2つのチャネルをそれぞれ異なる周波数のパイロット信号で変調する手段を含む。各光増幅器125において、モニタ手段102(図12参照)は、各パイロット信号を検出する手段を含み、パラメータ制御手段103(図12参照)は、検出された各成分の振幅がほぼ等しくなるように制御する手段を含む。

【0088】図16及び図17は、それぞれ第1の端局121及び第2の端局122の実施例を示すブロック図である。第1の端局121において、送信光源となるレーザダイオード131(#1, 2, ..., n)はそれぞれ

駆動回路132(#1, 2, ..., n)によって駆動されている。レーザダイオード131(#1, 2, ..., n)はそれぞれ波長 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ の信号光を出力し、これらの信号光はそれぞれ高速化に適した外部変調器133(#1, 2, ..., n)によって伝送データに基づく変調を受けた後、光マルチプレクサ134で合流される。

【0089】光マルチプレクサ134は2つの出力ポート134A及び134Bを有しており、合流した信号光(WDM信号光)の大部分は出力ポート134Aからこの端局の出力ポート140を経て光伝送路123(図15参照)へ送出される。外部変調器133(#1, 2, ..., n)における伝送データによる変調は、この例では強度変調である。

【0090】発振器135(#1, 2, ..., n)はそれぞれ周波数 $f_1, f_2, \dots, f_n$ のパイロット信号(トーン信号)を生成する。各パイロット信号はそれぞれ駆動回路132(#1, 2, ..., n)へ供給され、これによりレーザダイオード131(#1, 2, ..., n)はそれぞれ周波数 $f_1, f_2, \dots, f_n$ で周波数変調される。

【0091】各パイロット信号はまた同期検波回路を有する制御回路136へも供給されている。光マルチプレクサの出力ポート134Bから出力されたWDM信号光の一部は、ファブリペロ干渉計等からなる周波数分別器137を経てフォトディテクタ138へ供給される。WDM信号光が周波数分別器137を通ったことにより、フォトディテクタ138の出力には各パイロット信号の成分が表れ、この成分は増幅器139で増幅された後制御回路136へ供給される。

【0092】制御回路136は、一般的な同期検波の原理に従って、駆動回路132(#1, 2, ..., n)がレーザダイオード131(#1, 2, ..., n)へ供給する駆動電流を制御して、レーザダイオード131(#1, 2, ..., n)が出力する信号光の波長を安定化する。

【0093】パイロット信号の周波数は、伝送データによる主信号に影響を与えず、且つパイロット信号の検出が容易になるように、例えば1KHz~10KHzで互いに異なるように設定される。

【0094】図17に示されるように、第2の端局122は、WDM信号光を受ける入力ポート141を有している。受けたWDM信号光は、光デマルチプレクサ142でチャネル数分に分岐され、それぞれ光バンドパスフィルタ143(#1, 2, ..., n)へ供給される。光バンドパスフィルタ143(#1, 2, ..., n)はそれぞれ波長 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ の信号光を選択的に透過する。

【0095】各信号光は、光増幅器144(#1, 2, ..., n)で増幅された後、フォトディテクタを含む光/電気変換器145(#1, 2, ..., n)で電気信号に変

換えられ、これらの電気信号に基づき各チャネルの伝送データが再生される。

【0096】図15の光中継器124に適用可能な光増幅器の例を図14により説明する。光カプラ110で分岐される増幅されたWDM信号光の一部は、そのスペクトラムを検出するためのモニタ手段102へ供給される。供給されたWDM信号光は、ファブリペロ干渉計等からなる周波数弁別器151を通してフォトディテクタ152へ供給される。WDM信号光が周波数弁別器151を通ったことにより、フォトディテクタ152の出力にはパイロット信号の各成分が表れる。各成分は増幅器153で増幅された後、バンドパスフィルタ154（＃1, 2, ..., n）へ供給される。

【0097】バンドパスフィルタ154（＃1, 2, ..., n）は、それぞれ周波数 $f_1, f_2, \dots, f_n$ の信号成分を選択的に通過させる。通過した各信号成分は、比較的高速な伝送データによる変調成分と比較的低速なパイロット信号に基づく成分とを含んでいるので、これらのうちパイロット信号に基づく成分の振幅を検出するために、包絡線検波器155（＃1, 2, ..., n）が設けられている。

【0098】包絡線検波器155（＃1, 2, ..., n）の出力信号はそれぞれローパスフィルタ156（＃1, 2, ..., n）を介してコンバータ85へ供給される。パラメータ制御手段103（図12参照）の機能を含むCPU84は、モニタ手段102で検出されたパイロット信号に対応する各成分の振幅がほぼ等しくなるか或いは予め定められた関係になるように、プローブ光のパワーを制御する。これにより光増幅器のフラットな利得特性を得ることができる。

【0099】特に図15に示されるシステムのように、光中継器124を複数備えている場合には、利得特性がフラットでないことによる伝送品質の劣化が顕著になるので、本発明による光増幅器における利得特性の改善は、このようなシステムに有効である。

【0100】図16に例示した第1の端局121の構成においては、パイロット信号を各信号光の波長安定化にも用いているので、すべてのチャネルの信号光がパイロット信号によって変調されている。

【0101】しかしながら、光増幅器における利得特性の平坦化のみを目的とするのであれば、WDM信号光における2つのチャネルだけをパイロット信号で変調してもよい。この2つのチャネルは、例えば、WDM信号光における最短波長のチャネルと最長波長のチャネルである。

【0102】また、図16の実施例においては、各信号光をパイロット信号により周波数変調しているが、伝送データに比べて低速なパイロット信号を用いる場合には、各信号光をパイロット信号により強度変調してもよい。

【0103】一般に、送信光源がレーザダイオードである場合、その駆動電流にパイロット信号を重畳することができ、これと同時に、信号光が強度変調されている点に注目する。

【0104】このように信号光がパイロット信号により強度変調されている場合には、図14のモニタ手段102における周波数弁別器151は不要である。

【0105】

10 【発明の効果】以上説明したように、本発明によると、入力パワーやWDMのチャネル数の変化に係わらず利得の波長依存性が小さい光増幅器及び光通信システムの提供が可能になるという効果が生じる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明を適用可能な光増幅器の基本構成を示すブロック図である。

【図2】典型的なASEのスペクトラムを示す図である。

【図3】利得と光出力パワーの関係を示す図である。

20 【図4】ASE 3dB帯域幅と光増幅器段数の関係を示す図である。

【図5】反転分布の割合（ $N_2/N_t$ ）をパラメータとした利得特性の変化を示す図である。

【図6】利得を一定に保つ従来例を示すブロック図である。

【図7】本発明の第1の側面による光増幅器の基本構成を示すブロック図である。

【図8】図7の光増幅器の第1実施例を示すブロック図である。

30 【図9】図7の光増幅器の第2実施例を示すブロック図である。

【図10】図7の光増幅器の第3実施例を示すブロック図である。

【図11】図7の光増幅器の第4実施例を示すブロック図である。

【図12】本発明の第2の側面による光増幅器の基本構成を説明するためのブロック図である。

【図13】図12の基本構成の第1実施例を示す光増幅器のブロック図である。

40 【図14】図12の基本構成の第2実施例を示す光増幅器のブロック図である。

【図15】本発明の光通信システムのブロック図である。

【図16】第1の端局の実施例を示すブロック図である。

【図17】第2の端局の実施例を示すブロック図である。

【符号の説明】

3 光増幅媒体

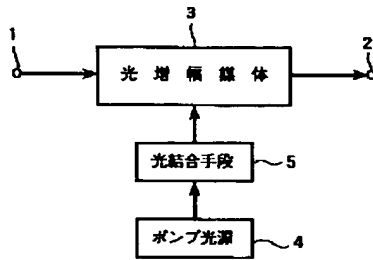
50 4 ポンプ光源

- 31 プロープ光源  
35 制御手段  
102 モニタ手段  
103 パラメータ制御手段

- 121 第1の端局  
122 第2の端局  
124 光中継器

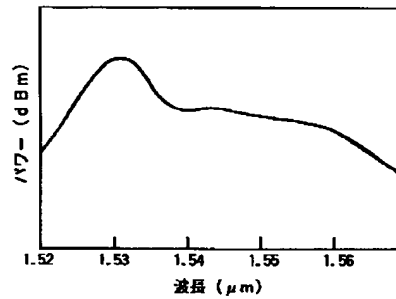
【図1】

光増幅器の基本構成を示すブロック図



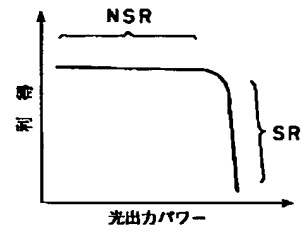
【図2】

典型的なASEのスペクトラムを示す図



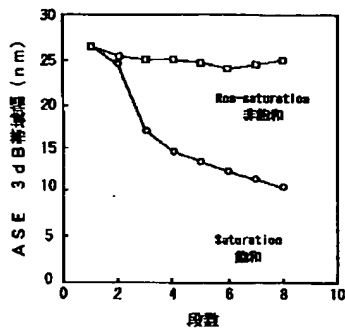
【図3】

利得と光出力パワーの関係を示す図

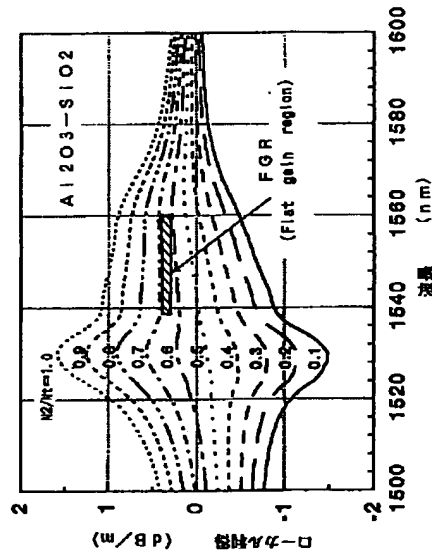


【図4】

ASE 3dB帯域幅と光増幅器段数の関係を示す図



【図5】

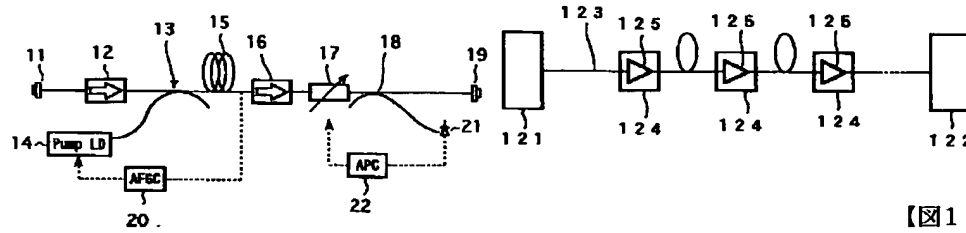
反転分布の割合 ( $N_2/N_t$ ) をパラメータとした利得特性の変化を示す図

【図6】

【図15】

利得を一定に保つ従来例を示すブロック図

### 本発明の光通信システムのブロック図

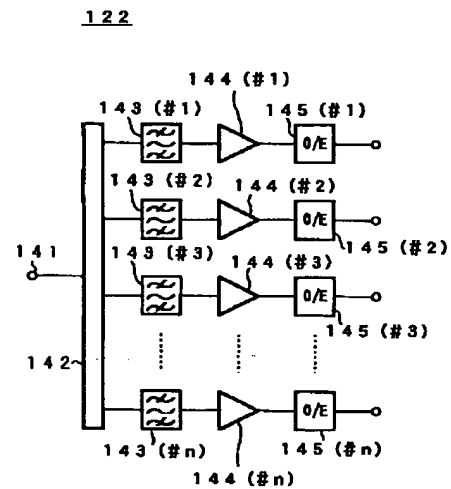
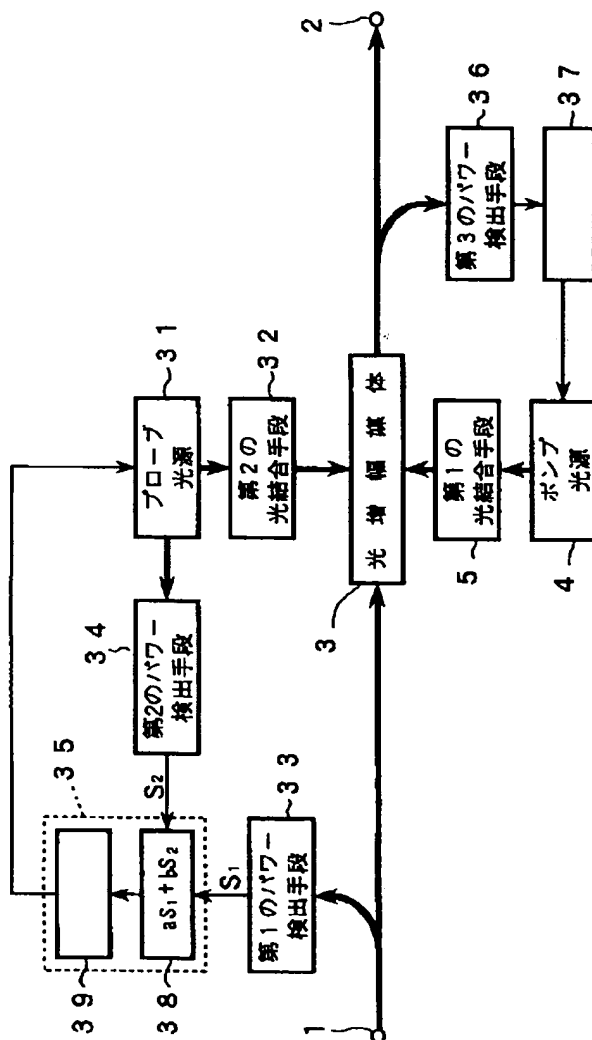


【図17】

【図7】

本発明の第 1 の側面による光増幅器のブロック図

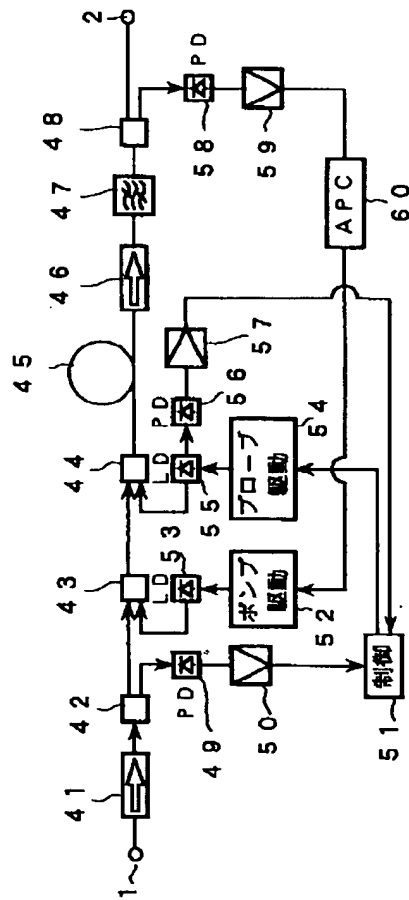
第2の端局の実施例を示すブロック図





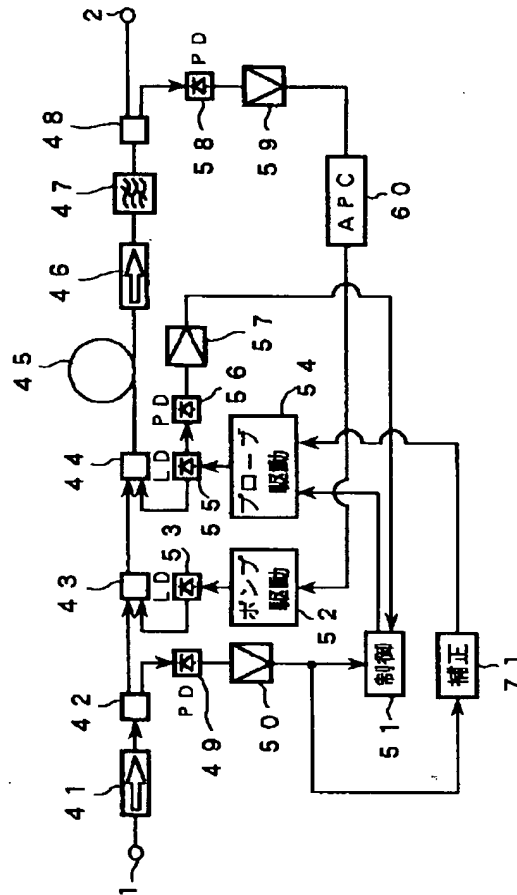
【図8】

図7の光増幅器の第1実施例を示すブロック図



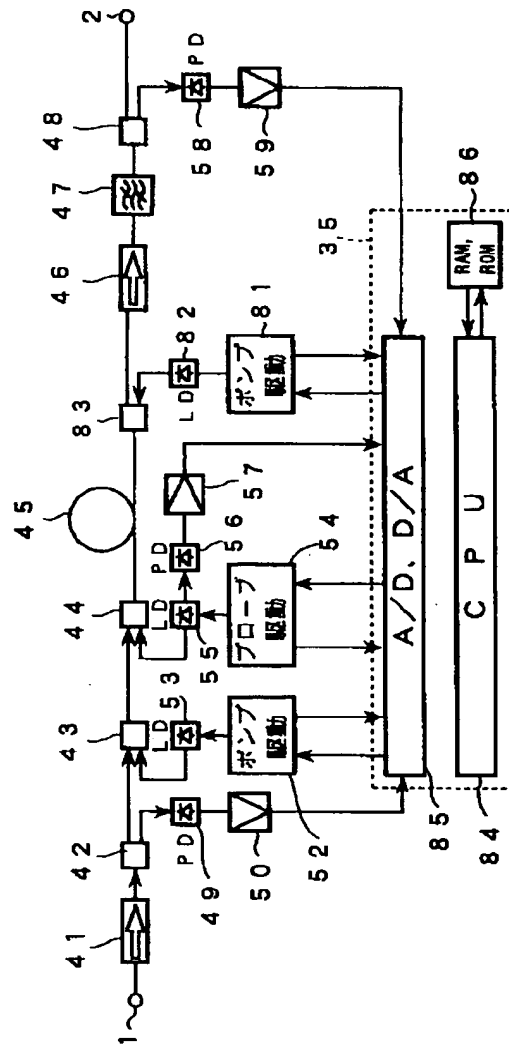
【図9】

図7の光増幅器の第2実施例を示すブロック図



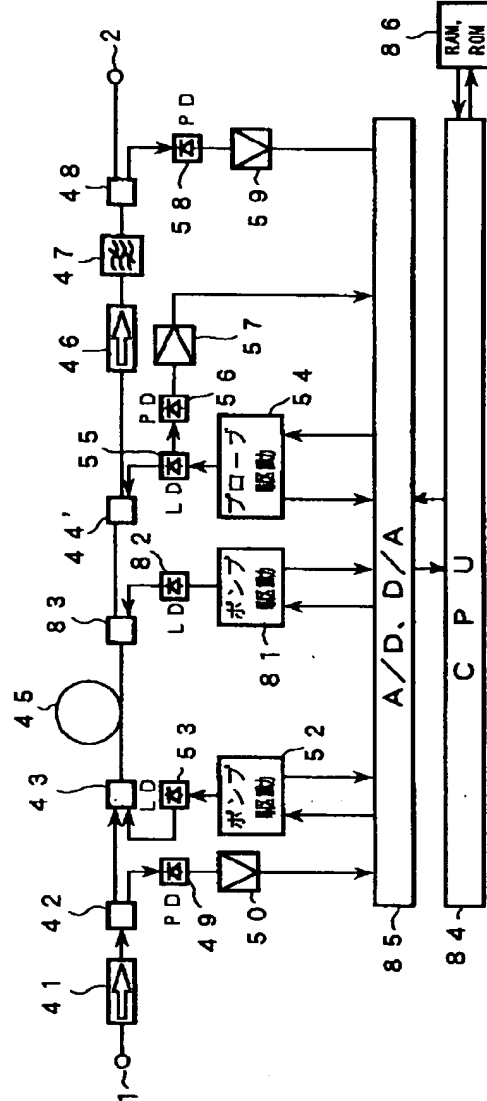
【図10】

図7の光増幅器の第3実施例を示すブロック図



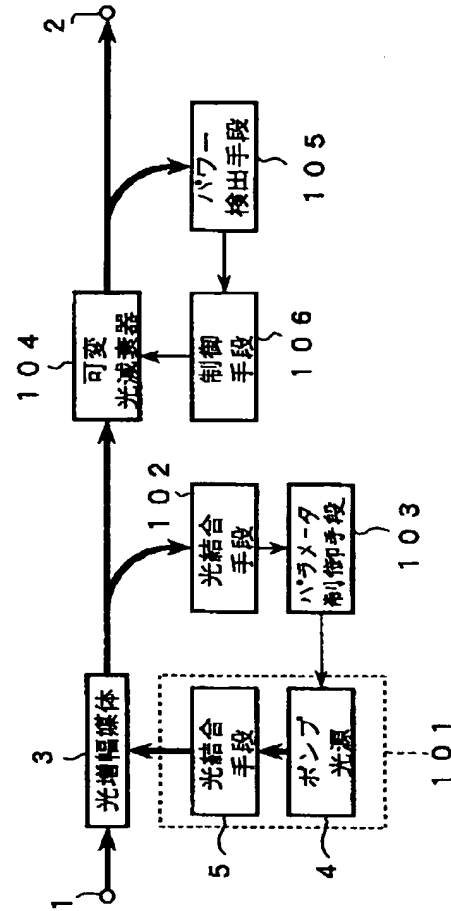
【図11】

図7の光増幅器の第4実施例を示すブロック図



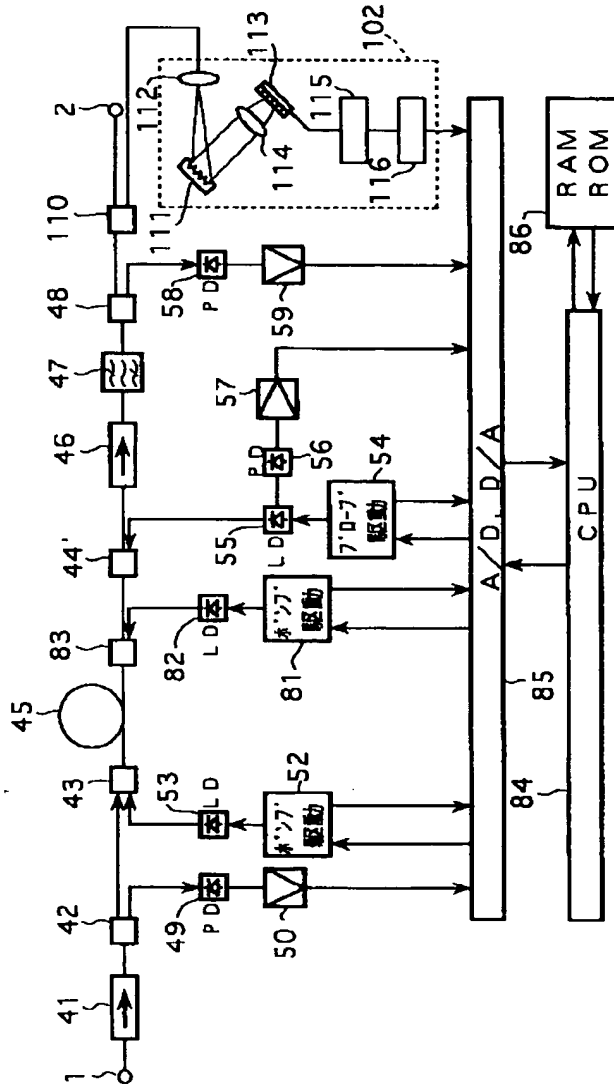
【図12】

本発明の第2の側面による光増幅器のブロック図



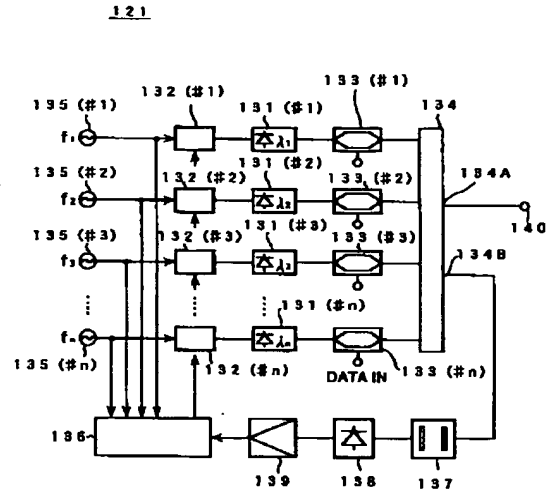
【図13】

図12の基本構成の第1実施例ブロック図



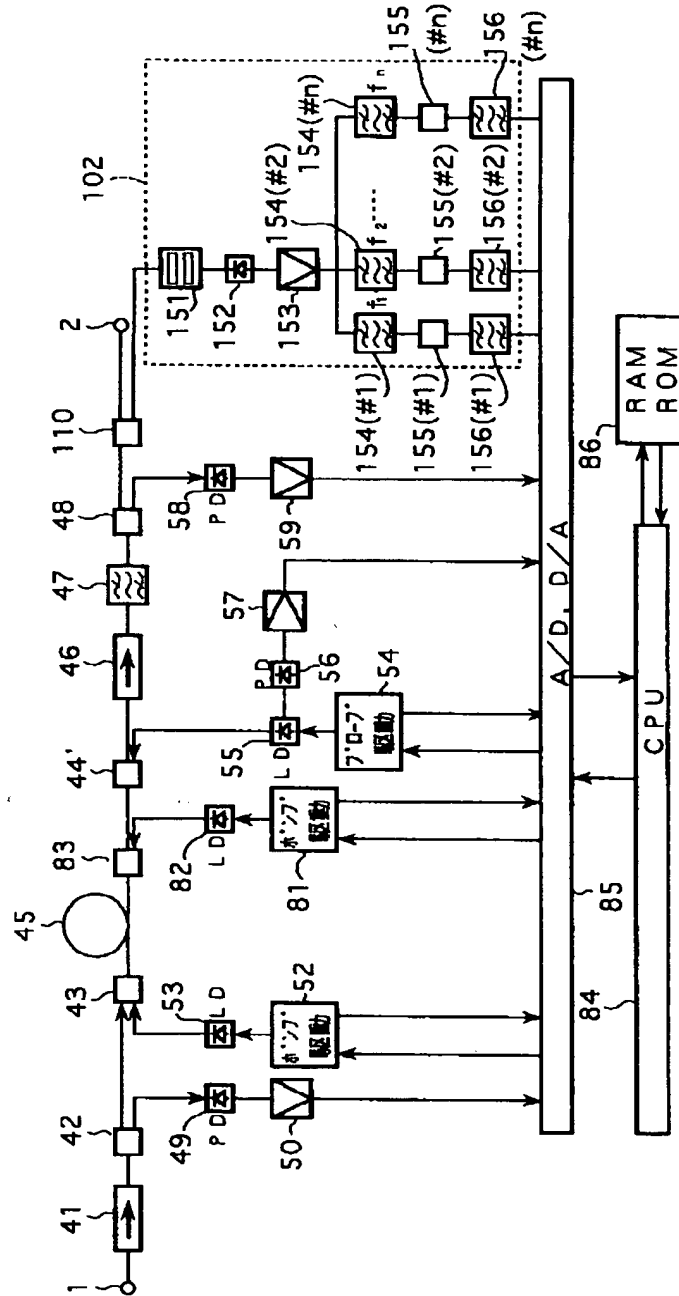
【図16】

第1の端局の実施例を示すブロック図



【图 14】

図 1 2 の基本構成の第 2 実施例ブロック図



フロントページの続き